

В общем виде, при применении средств контроля для поиска отказов n различных уровней, вероятностная модель и расчетная формула для нее будут иметь вид:

$$P(A) = P(A_1) + \sum_{i=1}^n P(A_{i+1} / \prod_{k=1}^i \bar{A}_k) \prod_{k=1}^i P(\bar{A}_k),$$
$$P(A) = 1 - \prod_{i=1}^n q_i .$$

УДК 621.311.004.12

Литература

1. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. 576 с.

Г.А. Большанин, Л.Ю. Большанина, Е.Г. Марьясова*

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПО ТРЕХПРОВОДНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Рассмотрены особенности распространения электрической энергии пониженного качества по трехпроводной линии электропередачи. Представлены законы распространения напряжения и тока по этим линиям. Построены графические зависимости распределения напряжения и тока вдоль трехпроводной линии электропередачи от емкости между проводом и заземленными конструкциями линии, от взаимной индуктивности между линейными проводами.

Ключевые слова: линия электропередачи, электрическая энергия пониженного качества, продольные и поперечные параметры, постоянная распространения, коэффициент фазы, коэффициент затухания электромагнитной волны.

Современные электроэнергетические системы (ЭС) содержат множество элементов силовой электроники, отличающихся ярко выраженной нелинейностью вольтамперных характеристик. Частые коммутационные переключения в ЭС вызывают колебательные процессы напряжений и токов. Все это способствует понижению качества электрической энергии.

Снижение качества электрической энергии (ЭЭ) существенно изменило условия снабжения электрической энергией промышленных и иных объектов. Изменения, как правило, негативного характера, сказались на функционировании практически каждого участка электроэнергетических систем (ЭС). Сказались они и на качестве транспортировки ЭЭ, а также на достоверности результатах анализа распространения по линиям электропередачи (ЛЭП) ЭЭ пониженного качества. Понижение качества электрической энергии оказалось причиной возникновения проблемы анализа распределения ЭЭ по линиям электропередачи.

Передача электрической энергии от места производства до места ее потребления в современных электроэнергетических системах выполняется при посредстве линий электропередачи чаще всего трехфазного исполнения. Это воздушные и кабельные линии. Транспортировка электрической энергии на дальние расстояния обычно выполняется воздушными линиями электропередачи высокого напряжения трехпроводного исполнения, если речь идет об одноцепной ЛЭП.

Традиционно при анализе результатов транспортировки электрической энергии по таким ЛЭП рассматривают передачу этой энергии по одному из проводов анализируемой линии электропередачи, а полученные при этом результаты распространяют на все три провода. При этом абсолютно без каких-либо серьезных оснований считается, что свойства распространения электрической энергии по однопроводной ЛЭП идентичны свойствам распространения этой энергии по трехпроводной линии электропередачи.

Трехпроводную ЛЭП в условиях пониженного качества электрической энергии, как и

однопроводную, следует принимать за линию с распределенными параметрами [1].

Электрическая энергия, передаваемая по участкам современных электроэнергетических систем, отличается широким спектром высших гармонических составляющих и высоким уровнем несимметрии напряжений и токов. Этот факт является причиной существенного влияния практически всех электромагнитных связей между токоведущими частями ЛЭП, а также между токоведущими и заземленными конструктивными элементами линии электропередачи, на количественные и качественные характеристики транспортировки электрической энергии. Такие связи учтены при построении электрической схемы замещения однородного участка ЛЭП трехпроводного исполнения элементарной протяженности на частоте n -й гармонической составляющей напряжения и тока, изображенной на рис. 1.

Продольные параметры здесь представлены погонными активными сопротивлениями проводов R_{0An} , R_{0Bn} , R_{0Cn} и их собственными индуктивностями L_{0An} , L_{0Bn} , L_{0Cn} . Собственные погонные емкости проводов нет смысла учитывать ввиду их малости.

Поперечные параметры представлены погонными емкостными связями между проводами C_{0ABn} , C_{0BCn} и C_{0CAn} , а также между

проводами и заземленными конструктивными элементами линии C_{0A0n} , C_{0B0n} и C_{0C0n} ; кроме того, они представлены погонными активными проводимостями G_{0ABn} , G_{0BCn} , G_{0CAn} и G_{0A0n} , G_{0B0n} , G_{0C0n} .

Магнитные связи между токоведущими частями трехпроводной ЛЭП учитываются погонными взаимными индуктивностями M_{0ABn} , M_{0BCn} и M_{0CAn} .

Методика определения количественных оценок продольных и поперечных параметров трехпроводной ЛЭП описана в [1].

Для анализа в данном случае представляется однородный участок трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения элементарной протяженностью dl .

Кроме того, на рис. 1 обозначены токи утечки по соответствующим электромагнитным связям di_{An} , di_{Bn} , di_{Cn} и di_{ABn} , di_{BCn} , di_{CAn} .

Математическая модель передачи электрической энергии на частоте n -й гармонической составляющей напряжения и тока по однородному участку трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения составляется на основании законов Кирхгофа и после ряда преобразований может быть представлена в виде совокупности следующих уравнений:

$$\begin{aligned}
 & u_{An}G_{0A0n}dl + C_{0A0n}dl \frac{\partial u_{An}}{\partial t} + u_{ABn}G_{0ABn}dl + C_{0ABn}dl \frac{\partial u_{ABn}}{\partial t} - \\
 & \quad - u_{CAn}G_{0CAn}dl - C_{0CAn}dl \frac{\partial u_{CAn}}{\partial t} + \frac{\partial i_{An}}{\partial l} dl = 0; \\
 & u_{Bn}G_{0B0n}dl + C_{0B0n}dl \frac{\partial u_{Bn}}{\partial t} + u_{BCn}G_{0BCn}dl + C_{0BCn}dl \frac{\partial u_{BCn}}{\partial t} - \\
 & \quad - u_{ABn}G_{0ABn}dl - C_{0ABn}dl \frac{\partial u_{ABn}}{\partial t} + \frac{\partial i_{Bn}}{\partial l} dl = 0; \\
 & u_{Cn}G_{0C0n}dl + C_{0C0n}dl \frac{\partial u_{Cn}}{\partial t} + u_{CAn}G_{0CAn}dl + C_{0CAn}dl \frac{\partial u_{CAn}}{\partial t} - \\
 & \quad - u_{BCn}G_{0BCn}dl - C_{0BCn}dl \frac{\partial u_{BCn}}{\partial t} + \frac{\partial i_{Cn}}{\partial l} dl = 0; \\
 & i_{An}R_{0An}dl + L_{0An}dl \frac{\partial i_{An}}{\partial t} + M_{0ABn}dl \frac{\partial i_{Bn}}{\partial t} + M_{0CAn}dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} + \frac{\partial u_{An}}{\partial l} dl = 0; \\
 & i_{Bn}R_{0Bn}dl + L_{0Bn}dl \frac{\partial i_{Bn}}{\partial t} + M_{0ABn}dl \frac{\partial i_{An}}{\partial t} + M_{0BCn}dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} + \frac{\partial u_{Bn}}{\partial l} dl = 0; \\
 & i_{Cn}R_{0Cn}dl + L_{0Cn}dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} + M_{0BCn}dl \frac{\partial i_{Bn}}{\partial t} + M_{0CAn}dl \frac{\partial i_{An}}{\partial t} + \frac{\partial u_{Cn}}{\partial l} dl = 0; \\
 & i_{An}R_{0An}dl + L_{0An}dl \frac{\partial i_{An}}{\partial t} + M_{0ABn}dl \frac{\partial i_{Bn}}{\partial t} + M_{0CAn}dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &+ i_{Bn} R_{0Bn} - L_{0Bn} dl \frac{\partial i_{Bn}}{\partial t} - M_{0ABn} dl \frac{\partial i_{An}}{\partial t} - M_{0BCn} dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} + \frac{\partial u_{ABn}}{\partial l} dl = 0; \\
 & i_{Bn} R_{0Bn} dl + L_{0Bn} dl \frac{\partial i_{Bn}}{\partial t} + M_{0ABn} dl \frac{\partial i_{An}}{\partial t} + M_{0BCn} dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} + \\
 &+ i_{Cn} R_{0Cn} dl - L_{0Cn} dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} - M_{0BCn} dl \frac{\partial i_{Bn}}{\partial t} - M_{0CAn} dl \frac{\partial i_{An}}{\partial t} + \frac{\partial u_{BCn}}{\partial l} dl = 0; \\
 & i_{Cn} R_{0Cn} dl + L_{0Cn} dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} + M_{0BCn} dl \frac{\partial i_{Bn}}{\partial t} + M_{0CAn} dl \frac{\partial i_{An}}{\partial t} + \\
 &+ i_{An} R_{0An} dl - L_{0An} dl \frac{\partial i_{An}}{\partial t} - M_{0ABn} dl \frac{\partial i_{Bn}}{\partial t} - M_{0CAn} dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} + \frac{\partial u_{CAn}}{\partial l} dl = 0.
 \end{aligned}$$

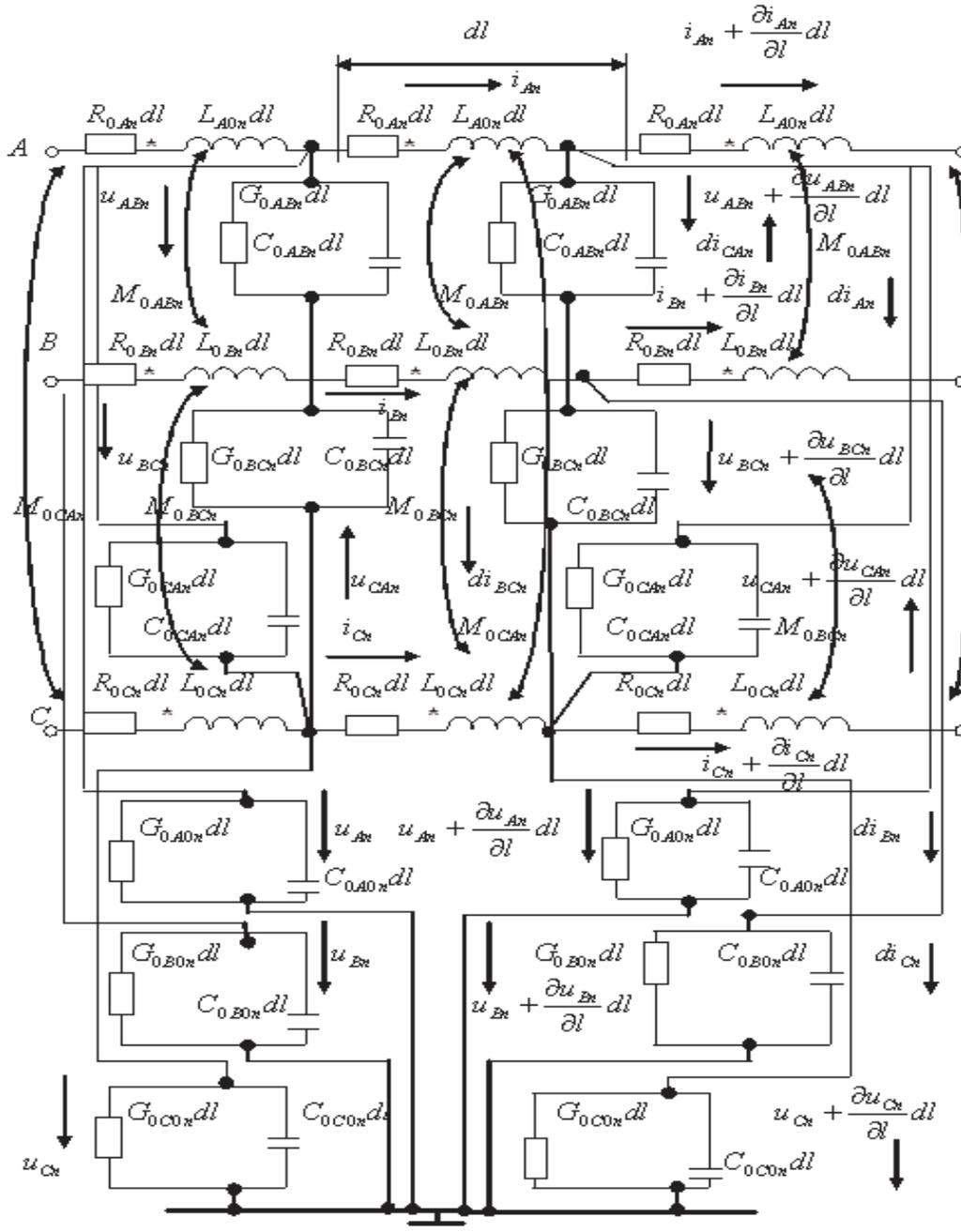


Рис. 1. Электрическая схема замещения элементарного участка трехфазной трехпроводной ЛЭП на частоте n -й гармонической составляющей.

Совместное решение этих уравнений позволит определить законы распределения напряжений и токов вдоль трехпроводной ЛЭП. При известных фазных напряжениях и линейных токах в начале рассматриваемого участка ЛЭП на частоте n -й гармонической составляющей – \dot{U}_{1An} , \dot{U}_{1Bn} , \dot{U}_{1Cn} и \dot{I}_{1An} , \dot{I}_{1Bn} , \dot{I}_{1Cn} – появляется возможность определить действующие значения напряжений и токов на расстоянии l от начала этого участка:

$$\dot{U}_{An} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (\dot{U}_{1An} ch\gamma_{in}l - \dot{I}_{1An} Z_{cAin} sh\gamma_{in}l); \quad (1)$$

$$\dot{U}_{Bn} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (\dot{U}_{1Bn} ch\gamma_{in}l - \dot{I}_{1Bn} Z_{cBin} sh\gamma_{in}l); \quad (2)$$

$$\dot{U}_{Cn} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (\dot{U}_{1Cn} ch\gamma_{in}l - \dot{I}_{1Cn} Z_{cCin} sh\gamma_{in}l); \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{An} = & \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \left(\dot{I}_{1An} ch\gamma_{in}l - \frac{\dot{U}_{1An}}{Z_{cAin}} sh\gamma_{in}l + \right. \\ & + \frac{\dot{I}_{1Bn} Z_{cBin}}{Z_{cABin}} ch\gamma_{in}l - \frac{\dot{U}_{1Bn}}{Z_{cABin}} sh\gamma_{in}l + \\ & \left. + \frac{\dot{I}_{1Cn} Z_{cCin}}{Z_{cCAin}} ch\gamma_{in}l - \frac{\dot{U}_{1Cn}}{Z_{cCAin}} sh\gamma_{in}l \right); \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{Bn} = & \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \left(\dot{I}_{1Bn} ch\gamma_{in}l - \frac{\dot{U}_{1Bn}}{Z_{cBin}} sh\gamma_{in}l + \right. \\ & + \frac{\dot{I}_{1An} Z_{cAin}}{Z_{cABin}} ch\gamma_{in}l - \frac{\dot{U}_{1An}}{Z_{cABin}} sh\gamma_{in}l + \end{aligned}$$

$$\dot{U}_{An} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (\dot{U}_{2An} ch\gamma_{in}y + \dot{I}_{2An} Z_{cAin} sh\gamma_{in}y); \quad (7)$$

$$\dot{U}_{Bn} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (\dot{U}_{2Bn} ch\gamma_{in}y + \dot{I}_{2Bn} Z_{cBin} sh\gamma_{in}y); \quad (8)$$

$$\dot{U}_{Cn} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (\dot{U}_{2Cn} ch\gamma_{in}y + \dot{I}_{2Cn} Z_{cCin} sh\gamma_{in}y); \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{An} = & \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \left(\dot{I}_{2An} ch\gamma_{in}y + \frac{\dot{U}_{2An}}{Z_{cAin}} sh\gamma_{in}y + \frac{\dot{I}_{2Bn} Z_{cBin}}{Z_{cABin}} ch\gamma_{in}y + \frac{\dot{U}_{2Bn}}{Z_{cABin}} sh\gamma_{in}y + \right. \\ & \left. + \frac{\dot{I}_{2Cn} Z_{cCin}}{Z_{cCAin}} ch\gamma_{in}y + \frac{\dot{U}_{2Cn}}{Z_{cCAin}} sh\gamma_{in}y \right); \quad (10) \end{aligned}$$

$$\dot{I}_{Bn} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \left(\dot{I}_{2Bn} ch\gamma_{in}y + \frac{\dot{U}_{2Bn}}{Z_{cBin}} sh\gamma_{in}y + \frac{\dot{I}_{2An} Z_{cAin}}{Z_{cABin}} ch\gamma_{in}y + \frac{\dot{U}_{2An}}{Z_{cABin}} sh\gamma_{in}y + \right.$$

$$\left. + \frac{\dot{I}_{1Cn} Z_{cCin}}{Z_{cBCin}} ch\gamma_{in}l - \frac{\dot{U}_{1Cn}}{Z_{cBCin}} sh\gamma_{in}l \right); \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{Cn} = & \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \left(\dot{I}_{1Cn} ch\gamma_{in}l - \frac{\dot{U}_{1Cn}}{Z_{cCin}} sh\gamma_{in}l + \right. \\ & + \frac{\dot{I}_{1An} Z_{cAin}}{Z_{cCAin}} ch\gamma_{in}l - \frac{\dot{U}_{1An}}{Z_{cCAin}} sh\gamma_{in}l + \\ & \left. + \frac{\dot{I}_{1Bn} Z_{cBin}}{Z_{cBCin}} ch\gamma_{in}l - \frac{\dot{U}_{1Bn}}{Z_{cBCin}} sh\gamma_{in}l \right), \quad (6) \end{aligned}$$

где γ_{in} – постоянная распространения i -й пары волн электромагнитного поля по токоведущим частям трехпроводной ЛЭП на частоте n -й гармонической составляющей; Z_{cAin} , Z_{cBin} , Z_{cCin} и Z_{cABin} , Z_{cBCin} , Z_{cCAin} – собственные и взаимные волновые сопротивления распространению i -й пары волн электромагнитного поля по токоведущим частям трехпроводной ЛЭП на частоте n -й гармонической составляющей.

При известных фазных напряжениях и линейных токах в конце рассматриваемого участка ЛЭП на частоте n -й гармонической составляющей – \dot{U}_{2An} , \dot{U}_{2Bn} , \dot{U}_{2Cn} и \dot{I}_{2An} , \dot{I}_{2Bn} , \dot{I}_{2Cn} – действующие значения напряжений и токов на расстоянии y от конца этого участка можно определить по формулам:

$$+ \frac{i_{2Cn} \underline{Z}_{cCin}}{\underline{Z}_{cBCin}} ch\gamma_{in} y + \frac{\dot{U}_{2Cn}}{\underline{Z}_{cBCin}} sh\gamma_{in} y \Big); \quad (11)$$

$$i_{Cn} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \left(i_{2Cn} ch\gamma_{in} y + \frac{\dot{U}_{2Cn}}{\underline{Z}_{cCin}} sh\gamma_{in} y + \frac{i_{2An} \underline{Z}_{cAin}}{\underline{Z}_{cCAin}} ch\gamma_{in} y + \frac{\dot{U}_{2An}}{\underline{Z}_{cCAin}} sh\gamma_{in} y + \frac{i_{2Bn} \underline{Z}_{cBin}}{\underline{Z}_{cBCin}} ch\gamma_{in} y + \frac{\dot{U}_{2Bn}}{\underline{Z}_{cBCin}} sh\gamma_{in} y \right). \quad (12)$$

Получается, что передача электрической энергии по каждому из линейных проводов трехпроводной ЛЭП обеспечивается тремя парами волн электромагнитного поля. Каждая пара электромагнитных волн характеризуется своей постоянной распространения.

Каждая пара электромагнитных волн в каждом линейном проводе обладает собственными волновыми сопротивлениями:

$$\underline{Z}_{cAin} = \frac{\Delta}{\gamma_{in} (\underline{Z}_{0Bn} \underline{Z}_{0Cn} - \underline{Z}_{0BCn}^2)};$$

$$\underline{Z}_{cBin} = \frac{\Delta}{\gamma_{in} (\underline{Z}_{0An} \underline{Z}_{0Cn} - \underline{Z}_{0CAin}^2)};$$

$$\underline{Z}_{cCin} = \frac{\Delta}{\gamma_{in} (\underline{Z}_{0An} \underline{Z}_{0Bn} - \underline{Z}_{0ABn}^2)},$$

где

$$\Delta = \underline{Z}_{0An} \underline{Z}_{0Bn} \underline{Z}_{0Cn} - \underline{Z}_{0An} \underline{Z}_{0BCn}^2 - \underline{Z}_{0Bn} \underline{Z}_{0CAin}^2 - \underline{Z}_{0Cn} \underline{Z}_{0ABn}^2 + 2 \underline{Z}_{0ABn} \underline{Z}_{0CAin} \underline{Z}_{0BCn}.$$

Три пары собственных для каждого линейного провода волн электромагнитного поля оказывают влияние на распределение электрической энергии в соседних проводах. Это влияние обусловлено электромагнитными связями между токоведущими частями трехпроводной ЛЭП. Наличие такого влияния объясняет необходимость введения понятия о взаимных волновых сопротивлениях:

$$\underline{Z}_{cABin} = \frac{\Delta}{\gamma_{in} (\underline{Z}_{0CAin} \underline{Z}_{0BCn} - \underline{Z}_{0ABn} \underline{Z}_{0Cn})};$$

$$\underline{Z}_{cBCin} = \frac{\Delta}{\gamma_{in} (\underline{Z}_{0ABn} \underline{Z}_{0CAin} - \underline{Z}_{0An} \underline{Z}_{0BCn})};$$

$$\underline{Z}_{cCAin} = \frac{\Delta}{\gamma_{in} (\underline{Z}_{0ABn} \underline{Z}_{0BCn} - \underline{Z}_{0CAin} \underline{Z}_{0Bn})}.$$

Уравнения (1) – (12), представляющие законы распространения напряжений и токов по трехпроводной ЛЭП, существенно отличаются

от уравнений, представляющих законы распространения напряжения и тока по однопроводной ЛЭП.

Пусть в транспортировке электрической энергии участвует трехпроводная ЛЭП почти симметричного исполнения со следующими первичными параметрами.

Погонные активные сопротивления линейных проводов: $R_{0A} = 0,13$ Ом/км; $R_{0B} = 0,132$ Ом/км; $R_{0C} = 0,127$ Ом/км.

Погонные собственные индуктивности проводов: $L_{0A} = 0,001$ Гн/км; $L_{0B} = 0,001$ Гн/км; $L_{0C} = 0,0011$ Гн/км.

Погонные взаимные индуктивности между линейными проводами: $M_{0AB} = 0,0005$ Гн/км; $M_{0BC} = 0,001$ Гн/км; $M_{0CA} = 0,0008$ Гн/км.

Величины погонных емкостей между линейными проводами: $C_{0AB} = 10^{-10}$ Ф/км;

$C_{0BC} = 9 \cdot 10^{-11}$ Ф/км; $C_{0CA} = 11 \cdot 10^{-11}$ Ф/км.

Величины погонных емкостей между линейными проводами и заземленными конструкциями линии: $C_{0A0} = 10^{-7}$ Ф/км;

$C_{0B0} = 9,5 \cdot 10^{-8}$ Ф/км; $C_{0C0} = 10,5 \cdot 10^{-8}$ Ф/км.

Погонные активные проводимости ввиду их малых величин предлагается не учитывать.

При известных первичных параметрах анализируемой ЛЭП появляется возможность определить ее вторичные параметры [1, 2].

При таких условиях фазное напряжение распределяется вдоль трехпроводной ЛЭП так, как показано на рис. 2. При указанных величинах первичных и вторичных параметров трехпроводной ЛЭП распределение напряжения носит колебательный характер с явно выраженным затуханием амплитуды напряжения от начала линии ($y = 1000$ км) к ее концу ($y = 0$). Подобным образом иллюстрируется и распределение вдоль ЛЭП линейного тока.

Сложный колебательный характер распределения напряжения и тока обусловлен нали-

чем в каждом линейном проводе ЛЭП трех пар волн электромагнитного поля. Законы распределения фазного напряжения и линейного тока, судя по уравнениям (1) – (12), представляют собой сумму распределений напряжений и токов от каждой пары волн электромагнитного поля. Это обусловлено действием взаимных электромагнитных связей между токоведущими частями трехпроводной ЛЭП, представленных в уравнениях взаимными волновыми сопротивлениями.

Распределение напряжения и тока вдоль трехпроводной ЛЭП от каждой пары волн электромагнитного поля зависит от величины вторичных параметров линии: от постоянных распространения электромагнитного поля и от собственных и взаимных волновых сопротивлений. Количественные значения вторичных параметров формируются из первичных параметров линии. Таким образом, получается, что распределение основных характеристик электрической энергии, в первую очередь, зависит от величин первичных параметров линии, то есть от параметров ее схемы замещения.

На рис. 3 показана зависимость распределения фазного напряжения вдоль однородного участка трехпроводной ЛЭП на частоте 15-й гармонической составляющей от величины емкостной связи между линейным проводом A и заземленными конструкциями исследуемой линии электропередачи C_{0A0n} . Из этой зависимости следует, что увеличение емкости C_{0A0n} до величины более 700 мкФ в линии протяженностью более 800 км наблюдается существенное возрастание напряжения.

На рис. 4 показана зависимость распределения фазного напряжения вдоль однородного участка трехпроводной ЛЭП на частоте 15-й гармонической составляющей от величины взаимной индуктивности между линейными проводами A и B . Эта зависимость свидетельствует о том, что в протяженных ЛЭП изменение величины M_{0ABn} в диапазоне от 0 до 0,1 Гн практически не оказывает влияния на качество распределения напряжения вдоль трехпроводной ЛЭП.

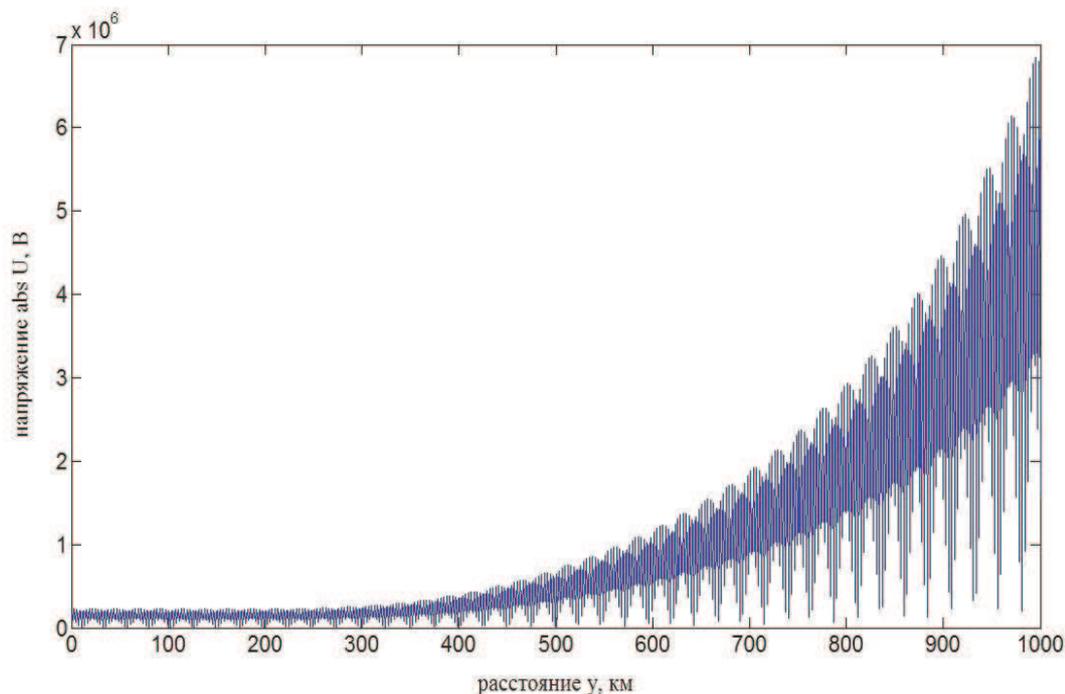


Рис. 2. Графическая интерпретация распределения фазного напряжения вдоль однородного участка трехпроводной ЛЭП на частоте 15-й гармонической составляющей.

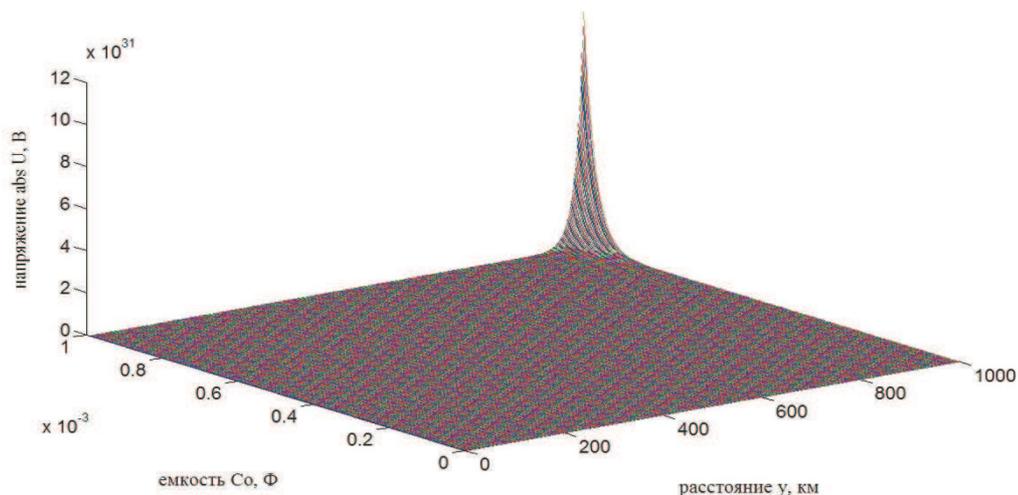


Рис. 3. Графическая зависимость распределения фазного напряжения U_A вдоль однородного участка трехпроводной ЛЭП на частоте 15-й гармонической составляющей от емкостной связи линейного провода А с заземленными конструкциями линии C_{0A0n} .

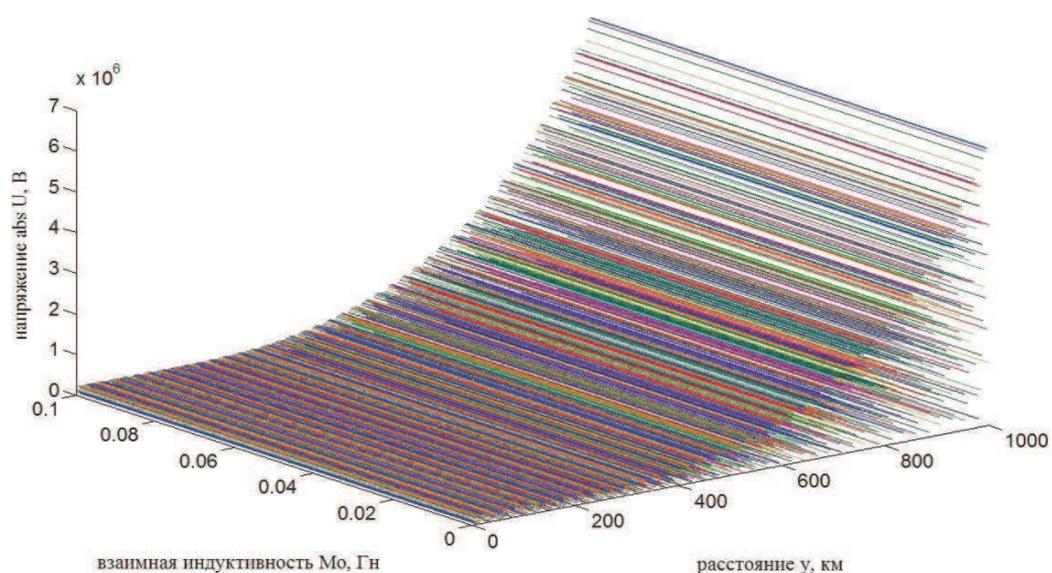


Рис. 4. Графическая зависимость распределения напряжения в фазе А вдоль однородного участка трехпроводной ЛЭП на частоте 15-й гармонической составляющей от взаимной индуктивности между линейными проводами M_{0ABn} .

Существует реальная возможность получения подобным образом зависимостей распределения основных характеристик электрической энергии вдоль трехпроводной ЛЭП от величины любого первичного параметра линии электропередачи.

Выводы.

1. Электрическая энергия в современных электроэнергетических системах отличается пониженным качеством, а именно: высокими уровнями несинусоидальности, несимметрии,

отклонениями и колебаниями напряжений и токов.

2. Участки электроэнергетических систем даже сравнительно небольшой протяженности при анализе результатов транспортировки по ним электрической энергии пониженного качества следует принимать за линии с распределенными параметрами.

3. Законы распространения фазных напряжений и линейных токов могут быть пред-

ставлены гиперболическими уравнениями (1) – (12).

4. Передача электрической энергии по каждому линейному проводу трехпроводной ЛЭП обеспечивается тремя парами волн электромагнитного поля, каждая из которых характеризуется своей постоянной распространения и своим комплектом собственных и взаимных волновых сопротивлений.

5. Закон распространения фазного напряжения и линейного тока по каждому линейному проводу трехпроводной ЛЭП есть результат суммирования законов распространения каждой из трех пар волн электромагнитного поля по этому проводу; причем, участие каждой пары волн практически равнозначно и не может быть игнорировано.

6. Количественная и качественная оценка распространения электрической энергии вдоль трехпроводной ЛЭП зависит от вторичных и, в конечном счете, от первичных параметров линии. В процессе исследования выявлено, что, например, при увеличении емко-

сти между одним из линейных проводов и заземленными конструктивными элементами ЛЭП более 700 мкФ на частоте 15-й гармонической составляющей в линиях протяженностью более 800 км величины напряжений и токов заметно возрастают, а величина взаимной индуктивности между линейными проводами, оказывается, на оценку распространения напряжения и тока существенного влияния не оказывает.

Литература

1. Большанин Г.А. Распределение электрической энергии пониженного качества по участкам электроэнергетических систем. В 2 кн. Братск: БрГУ, 2006. Т. 2. 807 с.
2. Большанин Г.А., Марьясова Е.Г. Характеристическое уравнение однородного участка трехфазной трехпроводной ЛЭП // Системы. Методы. технологии. 2009. № 2. С. 60-62.

УДК 517.929

С.В. Zubov*, М.В. Стрекопытова, С.А. Дутов

ОПЕРАЦИЯ СДВИГА И ОБЩАЯ МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ

На основе метода понижения порядка излагается алгоритм вычисления числа чисто мнимых корней у характеристического многочлена. Решение этой задачи позволит исследовать достаточно тонкий вопрос об устойчивости линейной системы в том случае, когда характеристический многочлен имеет, кроме корней, лежащих в левой полуплоскости, чисто мнимые, но не кратные корни. В статье приведена общая методика исследования качественной картины распределения корней произвольного многочлена на комплексной плоскости.

Ключевые слова: чисто мнимый корень, кратность, комплексная плоскость, многочлен, устойчивость, линейная система.

Статья актуальна в определении алгоритма вычисления числа чисто мнимых корней.

Покажем теперь, как использовать метод понижения порядка (МПП) в случае, когда при его применении встречается многочлен, у которого коэффициент при первой степени аргумента равен нулю $A_1 = 0$. Пусть задан многочлен $F(z)$ степени n , не имеющий нулевых корней, к которому МПП не применим

$$F(z) = a_0 + a_2 z^2 + \dots + a_{2p+1} z^{2p+1} + \dots + a_n z^n, \quad (1)$$

т. е. для общности положим, что не только $a_1 = 0$, но и

$$a_3 = \dots = a_{2p-1} = 0, \quad a_{2p+1} \neq 0, \quad p \geq 1.$$

Перепишем этот многочлен в виде

$$F(z) = g(z) + z^{2p} h(z), \quad (2)$$

$$g(z) = a_0 + a_2 z^2 + a_4 z^4 + \dots, \quad h(z) = a_{2p+1} z + a_{2p+3} z^3 + a_{2p+5} z^5 + \dots$$

* - автор, с которым следует вести переписку.